基于 C8051F005 的均匀轴向亚磁场产生和测量系统

蓝鑫冲[1,2]，蒋远大[1]，陈贞贞[1,2]，王 超[1]，翟光杰[1]

(1. 中国科学院复杂航天系统电子信息技术重点实验室,中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100190;
2. 中国科学院大学,北京 100190)

摘要:根据亚磁场生物学实验要求,利用 Silicon Labs 的 C8051F005 微处理器设计了一种轴向亚磁场产生和测量系统。基于亥姆霍兹线圈产生磁场的基本原理设计了一种新的磁场产生结构,采用 MAX038 产生交变磁场的硬件电路,使用磁阻磁强计对磁场进行精确测量,用 VC6.0 设计了上位机软件,图形化显示从磁阻磁强计传输过来的数据。实测表明,新结构产生磁场的均匀性要比亥姆霍兹线圈产生的磁场均匀性好,磁场均匀范围宽。亚磁场随电流的变化呈线性变化,具有很好的可控性,可通过简单设置控制交流磁场的频率。

关键词:C8051F005;MAX038;亚磁场;磁阻传感器;亥姆霍兹线圈

中图分类号:TP29;TP23 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8829(2015)01-0111-04

Production and Measurement System of Uniform Axial Hypomagnetic Field Based on C8051F005

LAN Xin-chong[1,2], JIANG Yuan-da[1], CHEN Zhen-zhen[1,2], WANG Chao[1], ZHAI Guang-jie[1]

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The production and measurement system of uniform axial hypomagnetic field based on Silicon Labs C8051F005 micro-processor is designed for the research on biological effects of the hypomagnetic field. A new structure for producing uniform axial hypomagnetic field is suggested according to the principle of magnetic field generated by Helmholtz coil. MAX038 is used for hardware circuit to generate the alternating magnetic field. The magnetic field can be accurately measured by magnetoresistive sensor, the data of which are transferred to the host computer via serial port, and then displayed graphically in real time. The uniformity of the magnetic field generated with the new structure is experimentally demonstrated to be better than that generated with Helmholtz coil. Experiments show that the magnetic field intensity is proportional to the current, and has the well controllability. The frequency of alternating magnetic field can be controlled by simple parameter setting.

Key words: C8051F005; MAX038; hypomagnetic field; magnetoresistive sensor; Helmholtz coil

磁感应强度总量在 $0<|B|\leq 5\ \mu T$ 区间内的静态弱磁场可定义为亚磁场[1]。随着空间技术的发展和中国载人航天的深入,未来航天员会长期暴露在亚磁场环境中,作为空间三要素之一的亚磁环境和微重力及宇宙辐射一样,都是未来空间探索中人类必须适应的宇宙环境因素。研究表明,亚磁场会对中枢神经系统的结构和功能带来负面影响[2]。亚磁场生物学效应的研究是空间生物学和航天医学中十分紧迫的任务。前苏联的科学家对亚磁场生物学效应的早期研究做出了突出贡献[3]。1989 年,我国第一个"零磁空间实验室"建成之后,亚磁生物学研究也逐渐在国内兴起并取得了一定成果[4]。由于在空间进行亚磁生物学效应的研究会受到成本、技术等因素的限制,因此在地面研制实时轴向亚磁场产生和测量系统,用以模拟亚磁场环境并进行亚磁生物学效应的研究具有重要的实际意义。针对这种迫切需求,设计了基于 C8051F005 的轴向亚磁场产生和测量系统(以下简称磁场系统),它可以产生和测量直流和交流磁场。直

收稿日期:2013-12-23

作者简介:蓝鑫冲(1987—),男,江西人,硕士研究生,主要研究方向为空间智能仪器、计算机应用技术、嵌入式系统。

流磁场具有实时性高、调节精度高、测试灵敏度高等特点;交流磁场的频率变化范围为 1 ~30 Hz。搭建的磁场系统满足空间亚磁场生物学实验的要求。

1　系统总体设计

磁场系统主要由 3 部分组成:下位机、上位机和磁场产生装置,如图 1 所示。

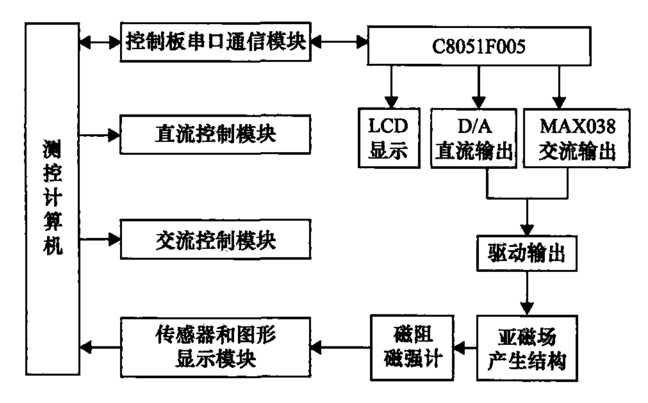


图 1　磁场系统总体设计框图

下位机以 C8051F005 为控制核心,利用单片机内部自带 D/A 输出直流电压用以产生磁场;利用 MAX038 芯片产生波形可变、频率可调的交变磁场。

上位机为磁场系统提供直观的信息服务和决策支持,主要包括:下位机串口通信模块、恒定磁场控制模块、交变磁场控制模块、磁场传感器通信和磁场数据实时显示模块。

轴向亚磁场产生装置由周期性排布的小螺线圈和坡莫合金高导磁材料组成。

2　磁场产生装置的设计

2.1　亚磁场产生原理

产生均匀磁场的结构有很多种:球状线圈[5]、三方载流方环[6]、载流圆线圈组[7]和亥姆霍兹线圈。基于亥姆霍兹线圈的磁场产生原理[8],对其进行了改进并提出了一种新的亚磁场产生结构装置。亥姆霍兹线圈产生的磁场示意图如图 2(a)所示,其产生磁场的均匀范围为图中双箭头指示的区域。新结构的磁场示意图如图 2(b)所示,其原理是利用小螺线圈的周期性排布将上下极板磁化,磁化后的上下极板类似磁铁的 N 极和 S 极,如图中双向箭头指示,其内部能产生均匀性较高的磁场。

2.2　磁场产生装置结构

磁场产生装置由圆柱体外壳、上下极板以及分布在极板上的小螺线管构成。圆柱外壳直径 200 mm,高 100 mm;上下极板的距离 50 mm;上下极板各 8 个螺线圈,距中心的距离 90 mm;线圈匝数 40 圈,直径 6 mm。上下极板和圆柱体外壳均由坡莫合金制成,每个螺线圈串联在一起。

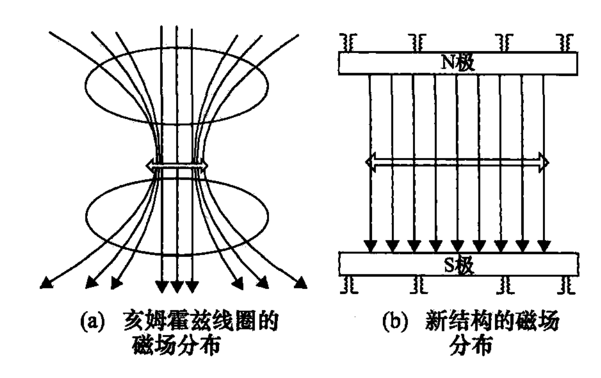


图 2　磁场示意图

3　硬件电路设计

磁场硬件设计框图如图 3 所示,主要由 RS232 转 USB、电源、液晶显示、信号发生、交直流驱动输出等模块组成。

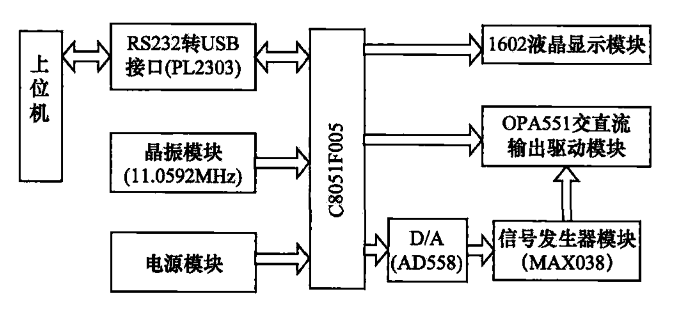


图 3　磁场系统硬件设计框图

直流信号是由单片机自带 12 位 D/A 提供,交流信号由函数发生芯片 MAX038 提供,液晶用于显示频率和波形等信息。下面介绍几个重要的模块电路。

3.1　微处理器系统

磁场系统的微处理器选用高性能 C8051F005,该器件使用的是 Silicon Labs 的专利 CIP-51 微控制器内核。该单片机有一个 12 位多通道 ADC 和两个 12 位 DAC;一个 32 KB 的 Flash 存储器; 2304 B 的 RAM,执行速度可达 25 MIPS。它具有速度高、资源配置灵活、中断支援多等特点,满足磁场系统的设计需要。

3.2　信号发生器模块

信号发生器模块主要是为了提供交变磁场而设计,其频率范围为 1 ~250 Hz,完全满足实验要求。该模块主要通过对 MAX038 及其外部电路进行控制来实现不同频率和不同波形的输出。控制 MAX038 的 A0 和 A1 管脚,对输入进行设置即能产生正弦波、方波和三角波。

MAX038 输出信号的频率由注入 IIN 引脚的电流 I_{IN},COSC 引脚端接的电容 C_F,以及引脚 FADJ 上的电压 V_{FADJ}决定。当 V_{FADJ}为 0 V 时,其基本输出频率f_o为

$$f_o(\mathrm{MHz}) = I_{IN}(\mu\mathrm{A})/C_F(\mathrm{pF}) \tag{1}$$

式中，I_{IN}为流入 IIN 引脚的电流(为获得最佳性能取 10～400 μA)；C_F 为连接 COSC 和地的电容。通过 8 位 D/A 转换器 AD558 输出不同的电压，连接一个 10 kΩ 的电阻控制流入 MAX038 的 IIN 引脚的电流和 C_F 来共同决定信号的输出频率值。

根据不同的电路连接形式 AD558 输出的电压挡位有 2.56 V 和 10 V 两个，此处选择 2.56 V 的挡位。根据电路图可知 C_F 为 1 μF，AD558 输出接 10 kΩ 电阻。当 AD558 输出在 0～2.56 V 变化时，I_{IN}在 1～250 μA 变化，其频率可以在 1～250 Hz 变化。

3.3 交直流驱动输出模块

此模块为直接驱动磁场产生结构而设计。直流信号由 C8051F005 自带 12 位 D/A 提供，其可调范围为 0～2.43 V；12 位 D/A 使得磁场具有较高的调节精度。交流信号由 MAX038 产生，通过调节滑动变阻器调节交流信号的幅值；使用一个加法器实现交流信号的偏置，偏置在 -5～+5 V 变化。交直流输出的选择通过一个 2 选 1 开关实现。为了增加输出电流，使用 OPA551 组成电压跟随。OPA551 是高电压、大电流放大器，其输出电流可以达到 200 mA。

3.4 USB 转串口和液晶显示模块电路

利用液晶来显示信号的频率、幅度、波形情况等信息。考虑到计算机上串口越来越少，使用芯片 PL2303 将串口转成 USB。将 PL2303 的 TXD 和 RXD 引脚分别与单片机的 P0.1(RXD)和 P0.0 (TXD)引脚相连，这样就实现了单片机串口与 USB 的转换。液晶显示使用 LCD1602 液晶，其显示容量为 16×2 个字符，芯片工作电压为 4.5～5.5 V，工作电流为 2.0 mA(5.0 V)，字符尺寸为 2.95 mm×4.35 mm($W×H$)。

4 软件设计

4.1 下位机软件的设计

下位机利用 C51 编程，下位机程序流程图如图 4 所示，主要功能是接收上位机通过 USB 传输过来的指令，并且根据指令选择交流输出的波形，可以是正弦波、方波、三角波，同时在液晶屏上显示相关信息。DATA[0]为 0X12 时，直流输出；DATA[0]为 0X01 时，交流输出。

4.2 上位机交互式界面设计

上位机交互式界面用 VC6.0 编写，主要包括控制板串口通信模块、直流控制模块、交流控制模块、传感器和图形显示模块，如图 5 所示。

控制板串口通信模块主要用来设置与下位机通信的串口波特率、串口号、数据发送和显示的格式、清空接收数据等功能。

直流控制模块主要用来设置直流 D/A 的参考电压、D/A 的位数和所需的直流输出电压，计算出对应的十六进制数后通过串口传输到下位机。

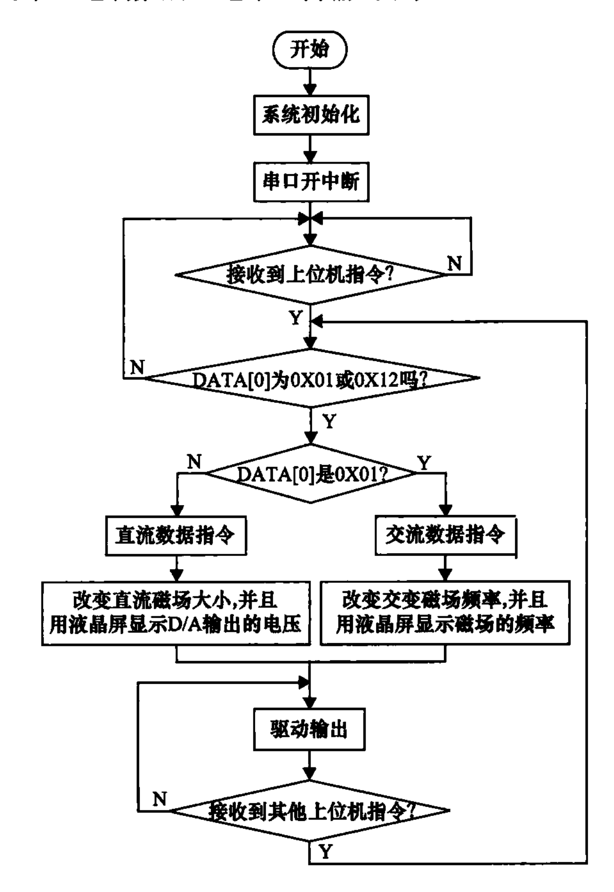


图 4 下位机软件流程图

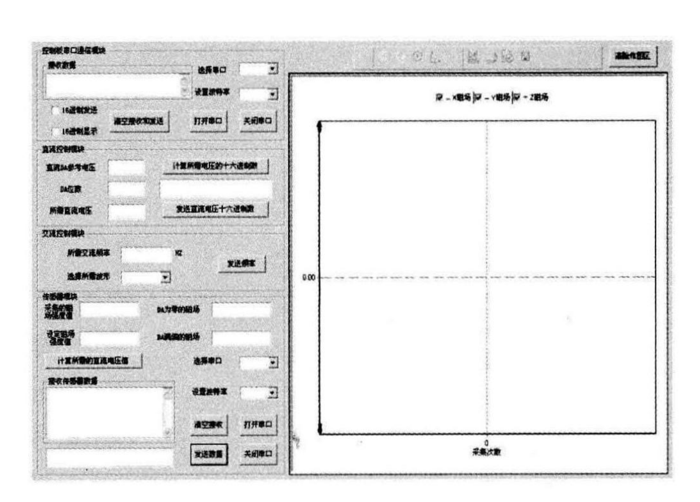


图 5 上位机交互式操作界面

交流控制模块用来设置输出交流电压的频率和波形。根据要求只需要设置 1～30 Hz 的交流信号，波形可以设置成正弦波、方波和三角波。

传感器模块配置好串口后才能实现传感器与上位机的通信。传感器使用的是磁阻传感器，测试精度为 0.1 nT，精度很高。为了给直流磁场设置提供方便，需要测出 D/A 电压为零时的剩余磁场，D/A 最大电压输出时磁场装置产生的最大磁场。

图形显示模块用来图形化显示磁场数据，并可以自动将采集的数据保存成 Excel 或者 txt 文件格式并导出，软件可以同时显示 X、Y 和 Z 三个磁场方向。

5　实验结果

5.1　直流磁场的测试

螺线圈组串联后的电阻为 10 Ω，给其提供 1.5 V 电压。测试横截面直径上不同位置的磁场强度，每隔 5 mm 作为一个测试点，每次测试采集 50 个数据并平均。测试新结构的轴向磁场分布图如图 6 中 A 曲线所示，测试范围为 150 mm 横截面直径的坐标。可以看出，由于圆柱桶外壁由坡莫合金构成，靠近外壁的磁场被约束在了外壁中，因而靠近外壳的磁场强度急剧的减小。除去边缘效应的影响，新结构磁场产生装置产生的磁场在中央较大面积内是均匀的。

为验证新结构的优越性，在相同的实验条件下使用相同的测量方法对亥姆霍兹线圈进行测试。亥姆霍兹线圈的直径为 180 mm，两线圈相距 50 mm，其与新结构的上下两极板的距离相同。为方便后续的分析，调节亥姆霍兹线圈的通电电压，使其产生的磁场大小与新结构产生的磁场大小相似，即大约 3200 nT 磁场。亥姆霍兹线圈的磁场测试结果如图 6 中 B 曲线所示。

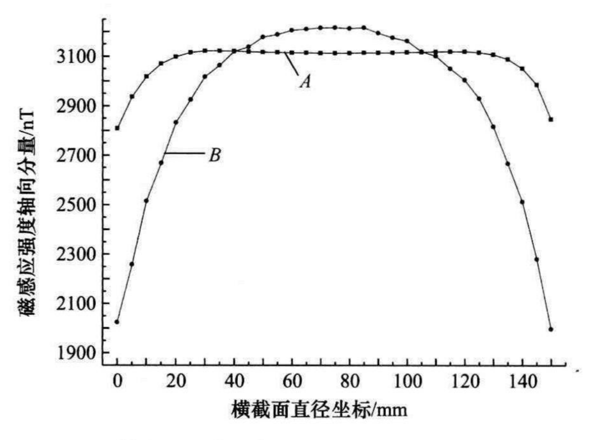


图 6　新结构和亥姆霍兹线圈产生的轴向磁场分布

定量分析新结构和亥姆霍兹线圈产生磁场的均匀性。由于图 6 中横坐标为横截面位置坐标，在考虑磁场均匀范围时将其转化为面积来计算。磁场的测试范围为 150 mm，即一个半径为 75 mm 的圆。

以磁场的最大值为基准，向下减小 50 nT 为均匀误差的情况下，新结构产生的均匀磁场范围为 15 ~ 135 mm，即半径为 60 mm 的圆，计算得到其磁场均匀范围为 64%；而亥姆霍兹线圈产生的均匀磁场范围为 50 ~ 100 mm，计算磁场的均匀范围只有 11%。而在均匀误差为 100 nT 的情况下，新结构产生的均匀磁场范围为 10 ~ 140 mm，均匀范围为 75%；而亥姆霍兹线圈产生的均匀磁场范围为 40 ~ 110 mm，均匀范围为 21%。将对比分析结果以表格的形式表示出来，如表 1 所示。可以看出新结构产生的磁场均匀范围为亥姆霍兹线圈的 3 ~ 6 倍，而且磁场的允许误差越小新结构的优越性越明显。

表 1　新结构和亥姆霍兹线圈磁场数据对比分析结果

允许误差范围/nT	采用亥姆霍兹线圈的磁场均匀范围/%	采用新结构的磁场均匀范围/%
50	11	64
100	21	75

为进一步研究新结构对亚磁场的可控性，对不同电流产生的磁场进行了测试，并将测得的实验数据取均值得到图 7。由实验结果可见，亚磁场随电流基本呈线性变化，具有很好的可控性。

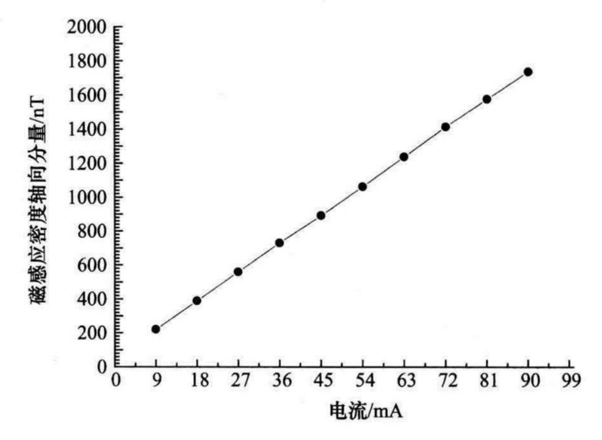


图 7　轴向亚磁场强度随电流的变化图

5.2　交流磁场的测试

控制 MAX038 产生频率为 10 Hz 的正弦波信号，测量交流磁场，如图 8 所示。上位机对磁场采集 1 s，得到磁场正弦波周期约有 9.9 个，即磁场的频率为 9.9 Hz，波形为正弦波且失真较小。交变磁场的峰峰值可以通过调节电路板的滑动变阻器来调节，改变 MAX038 产生的波形频率，则可调节磁场的频率，因此对交流磁场控制可以非常简便地实现。

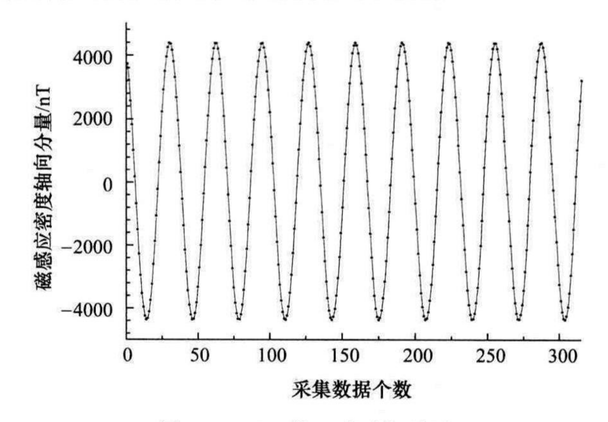


图 8　10 Hz 的正弦磁场波形

（下转第 118 页）

从表 1 中可以看出，超声电机驱动锁紧试验装置完成锁紧任务时，10 个锁紧作动弹片发生平均应变 367.6 με，每个沿半径方向锁紧力 F 平均值为 17.06 N。每个弹片上的锁紧力不相同，靠近锁叉的 5#弹片和 6#弹片的锁紧力最大，然后依次减小；这是由于弹簧绳的受力造成的，靠近锁叉的弹片受钢丝绳压力较大。所设计 10 个弹片共可对飞轮转子施加 170.06 N 的沿半径方向锁紧力。从表 1 可以看出超声电机与电磁电机分别驱动的锁紧试验装置沿半径方向的锁紧力 F 大小相似，可以达到同样的锁紧效果。因此可以使用超声电机替代电磁电机驱动锁紧装置完成锁紧和解锁任务，实现保护飞轮系统的目的。

锁紧过程中距弹片端部 L 处截面应变平均值随时间变化的曲线如图 5 所示。在前 50 s 钢丝绳未被张紧，无应变；随着超声电机转动，左、右锁叉相向摆动，拉紧钢丝绳，弹片受压，应变迅速增加。在接近锁紧状态时，弹片与飞轮接触，进而抱紧飞轮；到达行程时，电机停转，锁紧装置处于锁紧保持状态，应变趋于固定值。

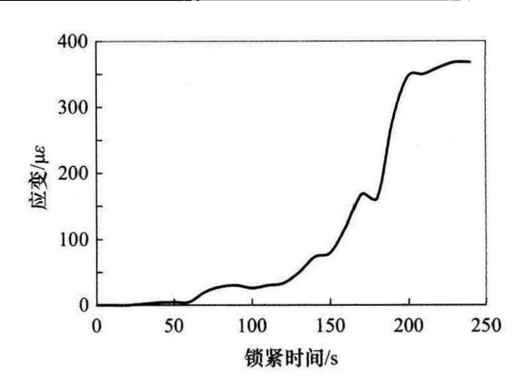


图 5　弹片应变随时间变化曲线

5　结束语

设计了锁紧效果试验装置，解决了锁紧力直接测试难的问题，有效地验证了锁紧装置的锁紧效果，对比了超声电机和直流电机驱动的锁紧装置，为超声电机驱动的新型锁紧装置走向应用提供了依据。试验表明：超声电机驱动超声电机驱动的锁紧装置可在 250 s 内完成锁紧和解锁动作，每个作动弹片可沿飞轮径向产生 17.06 N 的锁紧力，锁紧效果良好。对比试验表明，超声电机驱动的锁紧装置可以取代电磁电机作为驱动源。

参考文献：

[1]　刘强，房建成．磁悬浮飞轮用可重复抱式锁紧装置[J]．光学精密工程，2012，20(8)：1802 – 1810.

[2]　刘强，房建成，韩邦成，等．磁悬浮飞轮锁紧装置及其优化设计[J]．光学精密工程，2010，18(8)：1814 – 1821.

[3]　赵淳生．超声电机技术与应用[M]．北京：科学出版社，2007.

[4]　李晓牛，周盛强，姚志远，等．超声电机在磁悬浮飞轮锁紧装置中的应用[J]．振动、测试与诊断，2013，33(4)：555 – 559.

[5]　计欣华，邓宗白，鲁阳．工程实验力学[M]．北京：机械工业出版社，2005.

□

（上接第 114 页）

6　结束语

根据亚磁场实验要求，提出了一种新的磁场产生机构并搭建了基于 C8051F005 的一套轴向亚磁场产生和测量系统。该系统可以产生直流和交流磁场，与传统的亥姆霍兹线圈相比，磁场均匀范围较大。交流磁场的频率可以达到 1 ~ 30 Hz，波形失真小。利用上位机和磁阻传感器进行数据实时采集，具有磁场实时性高、磁场测试灵敏度高等特点。该磁场系统已成功应用于亚磁场生物学实验中，实测表明该磁场系统轴向磁场均匀范围大、数据采集稳定、实时性高、传输可靠，通过磁阻磁强计可以对磁场进行精确地测量，可广泛应用于亚磁场生物学实验和航天医学实验中。

参考文献：

[1]　莫炜川，刘缨，赫荣乔．亚磁场及其生物响应机制[J]．生物化学与生物物理进展，2012，39(9)：835 – 842.

[2]　(前苏联)Dubrov A P，(英文翻译)Sinclair F L．地磁场与生命：地磁生物学[M]．曾治权，等，译．北京：地质出版社，1985.

[3]　Zhadin M N. Review of russian literature on biological action of DC and low-requency AC magnetic fields[J]. Bioelectromagnetics，2001，22(1)：27 – 45.

[4]　贾斌，商澎．亚磁环境生物学效应的研究进展[J]．航天医学与医学工程，2009，22(4)：308 – 312.

[5]　殷恭维，唐列娟，吴书朝，等．产生匀强磁场的球状线圈设计[J]．电工技术学报，2007，22(1)：2 – 6.

[6]　吴亚东，李斌．利用三载流方环进行均匀磁场仿真[J]．计算机仿真，2009，26(3)：337 – 342.

[7]　莫克威．用载流圆线圈组产生均匀轴向磁场的方法[J]．长沙交通学院学报，1995，11(3)：1 – 5.

[8]　张昌莘，席伟，何颖君．圆电流和亥姆霍兹线圈磁场的研究[J]．安徽师范大学学报(自然科学版)，2004，27(1)：41 – 45.

□